

## Air, lumière, et matière réfractive

« Air », « atmosphère », « matière réfractive », « matière pesante »,...

Plusieurs auteurs, dans la première moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle, utilisent ces expressions lorsqu'ils étudient la localisation des astres. On sait qu'une des difficultés dans cette localisation provient de la déviation que la lumière issue de l'astre observé subit lors de la traversée de l'air, de l'atmosphère. Ce phénomène trouve-t-il son origine dans l'existence d'une « matière réfractive » différente de l'air ? Quelle(s) trace(s) trouvons-nous de cette interrogation dans l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert ? On tentera ici de répondre à ces questions.

Nous nous sommes intéressés, dans l'article AIR<sup>1</sup>, à deux renvois :

- l'un se trouve à la fin du paragraphe dans lequel est défini « l'Air vulgaire ou hétérogène », dont la masse est appelée Atmosphère.
- l'autre se trouve dans le paragraphe concernant la région de l'espace où « finit cet air », paragraphe qui renvoie à l'article REFRACTION<sup>2</sup>.

Ce dernier renvoi utilise le terme « pouvoir réfractif », sans d'ailleurs le définir. Cela nous intéressait de connaître son histoire, ses origines, ainsi que sa signification.

Pour répondre à ces questions, il faut s'orienter dans ces deux directions qui sont intimement liées : l'astronomie et l'optique. Ces deux domaines sont à prendre en considération pour qui s'intéresse à la question de savoir comment s'orienter sur Terre et surtout sur Mer grâce à l'observation des astres. Cette question revêt une importance particulière en 1729, moment où Pierre Bouguer (1698-1758) écrit un mémoire *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*<sup>3</sup> qui recevra un Prix de la part de l'Académie des Sciences, dans lequel il s'intéresse à un phénomène connu depuis fort longtemps, la réfraction astronomique.

Se repérer dans l'espace grâce à l'astronomie a été souvent source de questionnements, voire d'erreurs, et ce à cause de phénomènes lumineux. On peut ainsi aisément comprendre que le fait qu'il existe un milieu, l'atmosphère, entre un astre que l'on souhaite observer et l'observateur, puisse poser quelque problème. L'existence de ce milieu peut ainsi entraîner un phénomène de réfraction lumineuse dont la conséquence est que l'astre observé ne se trouve pas dans sa position « véritable ». Ce phénomène était bien connu par les astronomes depuis fort longtemps ; cependant, l'évaluation précise du décalage ainsi créé, était rendu difficile, non seulement parce qu'on ne connaissait ni la hauteur précise de l'atmosphère terrestre, ni la loi de l'éventuelle variation de sa densité, mais aussi parce qu'on ne possédait pas les outils

---

<sup>1</sup> Jean Le Rond d'Alembert, *Encyclopédie de Diderot et d'Alembert* (1765), *Enc.*, I, 255b.

<sup>2</sup> Ibid, *Enc.*, XIII, 892b.

<sup>3</sup> Pierre Bouguer, *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres*, pièce qui a remporté le prix proposé par l'Académie des sciences pour l'année 1729, Paris, Claude Joubert, 1729.

mathématiques permettant de déterminer la trajectoire qu'empruntait la lumière issue de l'astre observé dans l'atmosphère qu'elle traversait.

Quelle est la cause de cette déviation ? Est-elle due à l'atmosphère, ou à quelque autre matière ? Bouguer s'interroge à plusieurs reprises dans son *Mémoire*, ainsi que dans l'*Essai d'optique sur la gradation de la lumière*<sup>4</sup> quant à la possibilité de l'existence ou non d'une « matière réfractive ». Existe-t-il une « matière réfractive » différente de la « matière pesante » qui soit cause de la réfraction lumineuse ? Est-il légitime de se poser cette question ? N'est-il pas préférable d'évoquer, avec l'anglais Lowthrop (1659-1724)<sup>5</sup>, l'existence d'un pouvoir réfractif, sans pour autant s'interroger sur sa cause ? Ce dernier s'interroge en effet sur cette question en 1699, et admet que :

It seems very probable that their respective densities and refractive powers are in a just simple proportion. And if this should be confirm'd by succeeding experiments made at different angles of incidence and with cylinders continuing exhausted through several changes of the air it would be more than probable that the refractive powers of the atmosphere are very where, at all heightd above the earth, proportional to it's densities and expansions<sup>6</sup>.

Ainsi une hypothèse est-elle avancée, à savoir que la puissance réfractive est proportionnelle à la densité du milieu traversé par la lumière. Elle est justifiée par sa capacité prédictive, puisque son énoncé devrait permettre

to trace the light through it, thereby to terminate the shadow of the earth, and to examina t what distances the moon must be from the earth to suffer eclipses of the observed duration<sup>7</sup>.

Pour bien comprendre l'enjeu de ces questions, il faut revenir sur les observations faites en Suède<sup>8</sup> par Spole (1630-1699) et Bilberg (1646-1717) en 1695, dont le sérieux sera d'ailleurs discuté par la suite. Leurs résultats vont être examinés par les académiciens dans le MARS daté de 1700 à la lumière de l'expérience réalisée à Londres par Lowthrop. Fontenelle (1657-1757), dans la partie historique de ce MARS, opère en effet un rapprochement explicite entre le résultat de Lowthrop et les observations de Suède ; il s'interroge d'abord quant au bien-

---

<sup>4</sup> Bouguer, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, Paris, Joubert, 1729.

<sup>5</sup> Lowthrop, An experiment nof the refraction of the air made at the command of the royal society, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, N°257, 1699, p.341 : “ By the refractive power of a pellucid body I mean that properly in it whereby the oblique rays of light are diverted from their direct course ; and which is measured by the proportional differences always observed between the sines of the angles of incidence and emersion.”

<sup>6</sup> Ibid, p.342. Nous donnons ici la traduction de ce Mémoire, qui sera présenté dans les Mémoires de l'Académie Royale des Sciences (MARS par la suite), 1700 par Jean-Dominique Cassini : « L'on peut conjecturer de là que les densités de l'air & de l'eau sont proportionnelles à leurs puissances réfractives ; & si l'on peut confirmer cela par des expériences que l'on feroit dans la suite par le moyen des cylindres vuides d'air à différens angles d'incidence en divers changemens d'air, il serait plus probable que les puissances réfractives de l'atmosphère sont partout à toutes les hauteurs au-dessus de la terre, proportionnelles à leurs densités & à leurs raretés. » Cassini, Expérience sur la réfraction de l'air, MARS 1700, p.82.

<sup>7</sup> Ibid, « de connaître par-là quelle est la trace que doit faire la lumière au travers de l'atmosphère pour terminer l'ombre de la terre, & d'examiner à quelle distance il faut que la Lune soit pour souffrir des Eclipses dont la durée a été observée. » p.82

<sup>8</sup> Spole, professeur de mathématiques à Uppsala, avait fait le voyage d'Uranibourg avec Jean Picart (1620-1682) pour vérifier les observations de Tycho Brahé. Sur ordre du roi, il part dans le nord de la Suède avec Bilberg pour une nouvelle campagne d'observations concernant la réfraction. *Refractio Solis inoccidui in septentrionalibus oris, juffu Carolis XI, Regis Suevorum, &c. à Joanne Bilberg Holmiae*, 1695. Voir le Journal de Trévoux, novembre-décembre 1701, 384.

fondé des résultats de l'expérience anglaise, et demande à Homberg (1652-1715) de la reproduire. Celui-ci obtient un résultat opposé à celui de Lowthrop. Il trouve en effet que la lumière ne subit aucune déviation lors de son passage du vide dans l'air. Fontenelle en conclut alors que « l'expérience de Paris, quoique moins probable que celle de Londres, mène à une conclusion qui ne serait pas improbable<sup>9</sup>. » Les observations faites en Suède le conduisent ensuite à s'interroger également sur l'exactitude et la pertinence de celles-ci au vu de leurs conséquences que La Hire (1640-1714), puis Cassini, moyennant quelques hypothèses concernant la nature de l'atmosphère, déduiront de leur étude, et que nous allons examiner.

Il s'agissait de rendre compte des faits suivants : d'une part, Philippe de La Hire avait lu le 13 février 1700 un mémoire dans lequel il avait remarqué que le baromètre donnait les mêmes indications en Suède et à Paris. D'autre part, Jean-Dominique Cassini (1625-1712), en poursuivant ses recherches à partir des résultats des observations de Spole et Bilberg en Botnie qu'il s'était fait communiquer, avait essayé de connaître la hauteur de l'air réfractif pour déterminer les variations des réfractions astronomiques à toutes les hauteurs<sup>10</sup>. Dans un mémoire lu à la séance suivante du 17 février, il avait émis l'hypothèse que l'air était homogène, et en était arrivé à la conclusion que les réfractions en Botnie devaient être presque double de celle de Paris, et plus du double de celle de l'équateur<sup>11</sup>. Cela signifiait donc que la réfraction de la lumière devait nécessairement augmenter avec la latitude. Fontenelle, dans la partie histoire, avait alors fort justement rapproché ces deux résultats de La Hire et Cassini et en avait conclu qu'alors l'air aux pôles était plus « épais » (la réfraction est plus importante), mais n'était pas plus pesant (la pression est la même)<sup>12</sup> :

Il y a une remarque à faire, laquelle est fort considérable, que la partie de l'air qui cause les Réfractions, n'a point de rapport avec celle qui fait la pesanteur, puisqu'il arrive à Stockholm et à Paris les mêmes changements de mercure dans le tuyau du baromètre, & qu'on y a aussi observé les mêmes hauteurs à très-peu-près.

Si la pesanteur n'était pas la cause des réfractions, alors celles-ci n'étaient-elles pas dues à l'existence d'une matière réfractive particulière ?

Un mois plus tard, le 24 février 1700, Jacques Cassini (1677-1756) avait présenté un mémoire<sup>13</sup> dans lequel il donnait la traduction de l'expérience de Lowthrop publiée l'année précédente dans les *Philosophical Transactions*<sup>14</sup>, et y ajoutait quelques commentaires. Il ne discutait pas la pertinence du point de vue de Lowthrop, mais en analysait les résultats, en remarquant qu'ils étaient en contradiction avec les résultats des observations que son père Jean-Dominique Cassini avait consignées dans "les Ephémérides de Malvasie de l'an 1661"<sup>15</sup>.

---

<sup>9</sup> Fontenelle, *Histoire de l'Académie Royale des Sciences (HARS par la suite) 1761 (1700)*, *Sur les réfractions*, 116.

<sup>10</sup> Jean-Dominique Cassini, *Réflexions sur les observations faites en Botnie*, MARS 1761 (1700), 39 à 46.

<sup>11</sup> Ibid., 39.

<sup>12</sup> Fontenelle, o.c. in n. 9, 114.

<sup>13</sup> Jacques Cassini, *Expérience de la réfraction de l'air*, MARS 1761 (1700), 78-83.

<sup>14</sup> Lowthrop, o.c. in n.5.

<sup>15</sup> Cassini, o.c. in n.13, 82. Jean-Dominique Cassini fût responsable de l'observatoire du marquis Cornelio Malvasia à Panzano. Il publia des tables dans les éphémérides de Malvasia parues à partir de 1661 sous le titre *Ephemerides novissimae motuum coelestium . . . additis ephemeridibus solis, et tabulis refractionum ex novissimis hypothesis . . . Joannis Dominici Cassini . . .* (Mutinae [Modena], 1662. Voir Delambre, *Histoire de l'astronomie moderne*, tome II, 1821, p.722 ; John W. Olmsted, *The Expedition of Jean Richer to Cayenne* Source: *Isis*, Vol. 34, No. 2 (Autumn, 1942, pp. 117-128, p.123 ; Anna Cassini, "I Maraldi di Perinaldo" [les Maraldi de Perinaldo], , Comune di Perinaldo, 2004.

D'où un certain scepticisme quand à la validité de cette expérience, et des interrogations sur les causes de la réfraction.

Ce tournant du siècle se caractérise donc dans ce domaine par des interrogations nombreuses concernant les questions touchant tant à la validité de l'expérience anglaise qu'aux observations suédoises. Ce qu'on cherche en priorité, c'est à élaborer un modèle cohérent pour rendre compte de ces phénomènes. De nouvelles études seront publiées deux ans plus tard dans les MARS. La Hire étudiera à nouveau les résultats précédents, et sera alors conduit à formuler deux hypothèses sur le milieu : d'une part, l'atmosphère n'est pas homogène, et la densité varie continûment ; d'autre part, la réfraction varie continûment avec la densité. C'est Maraldi (1709-1788)<sup>16</sup> qui, l'année suivante, en analysant à nouveau les résultats précédents, introduira la possibilité de l'existence d'une matière réfractive. Il s'appuiera pour cela d'abord sur les relevés barométriques qui montraient que les variations de pression étaient plus importantes au Pôle qu'en France, ce qui levait donc la contradiction relevée précédemment en 1700 par La Hire. Partant ensuite des interrogations émises également en 1700 par Cassini sur la validité de l'expérience anglaise, il sera finalement conduit à envisager, malgré quelques doutes, la possibilité de l'existence d'une matière réfractive : existe-t-elle dans la nature, ou comme Cassini semblait le penser, ne serait-elle qu'« invention commode pour le calcul des réfractions<sup>17</sup> ? »

Nous avons évoqué les observations faites en Suède. D'Alembert, dans l'article AIR n'y fait pas allusion. Cependant, nous avons vu que cet article nous renvoie, lorsque D'Alembert s'interroge sur les limites de l'atmosphère, à l'article REFRACTION, qui lui-même est intéressant lorsqu'il évoque la question de la cause du pouvoir réfractif. En effet, il rediscute les résultats précédents à partir des observations faites par « deux mathématiciens célèbres », Spole et Bilberg :

Quoiqu'il semble naturel d'expliquer ces effets par la *réfraction*, cependant il faut avouer que par les observations les plus exactes faites dans la zone glacée, les *réfractions* ne paroissent pas assez considérables pour produire des effets si singuliers. Ainsi il faut croire ou que les faits dont on vient de parler n'ont pas été bien observés, ou, ce qui est plus vraisemblable, qu'ils dépendent de quelqu'autre cause.

Un nouvel argument en faveur de l'existence d'une matière réfractive sera avancé par Fontenelle dans l'histoire de l'académie royale des sciences de 1706, qui évoquera les recherches de Cassini<sup>18</sup> :

Il semblerait de même que la réfraction d'un astre vu au travers d'un nuage devrait être plus grande. Elle ne l'est pourtant pas, & c'est ce que M. Cassini & le P. Laval ont observé plusieurs fois. De là M. Cassini conjecture qu'il pourrait y avoir dans l'air une *matière réfractive* différente de l'air.

Fontenelle insistera sur le paradoxe déjà évoqué en 1700 : les réfractions paraissent avoir un certain rapport avec la constitution de l'air ; on observe qu'elles sont plus importantes au pôle que dans la zone torride. Et pourtant, la pression est la même dans ces deux régions. Jean-

---

<sup>16</sup> Jacques-Philippe Maraldi, *Expériences du baromètre faites sur diverses montagnes de France*, MARS 1720 (1703), 229-237.

<sup>17</sup> Ibid., 237.

<sup>18</sup> Fontenelle, Sur les réfractions, *HARS 1731* (1706), 103. Nous n'avons pas trouvé de tels arguments dans les Mémoires de 1706. L'auteur se réfère probablement au Mémoire de 1700 présenté précédemment.

Dominique Cassini, en juin 1706, reprendra cette idée, mais sans pour autant conclure, et avancer la moindre explication. L'année suivante, il demandera alors au père Laval de poursuivre ses observations de l'horizon de la mer à l'observatoire de Marseille<sup>19</sup>, et prenant en compte d'autres paramètres, il remarquera que les variations observées de la hauteur apparente de la Mer n'ont pas de lien régulier avec la température ou la pression. Cela le conduira alors à conclure à nouveau que l'hypothèse que la cause de la réfraction ne trouve pas ses origines dans la matière pesante : La partie de l'air qui cause la réfraction est d'une nature différente de la partie à laquelle on attribue la pesanteur qui équilibre la hauteur des liqueurs dans la vide.

D'autres observations seront faites pendant plusieurs années ; des expériences seront mises au point, notamment par Hawksbee (1666-1713) en 1709, qui mettra en évidence la validité de l'expérience anglaise, et donc la proportionnalité entre la réfraction atmosphérique et la densité du milieu traversé<sup>20</sup>. Jacques Cassini, en 1714, lors d'étude sur la réfraction astronomique<sup>21</sup>, montrera que la hauteur de la matière réfractive est différente de celle de l'atmosphère, et puisqu'on ne peut en conséquence identifier les deux, il faut postuler l'existence d'une matière réfractive<sup>22</sup> :

Cette hauteur de 2000 toises, qui n'est pas d'une lieue, est beaucoup plus petite que celle de 6 lieues ½ que donnent à l'atmosphère ceux qui lui donnent le moins, comme Messieurs Cassini et Maraldi (...). L'atmosphère ne seroit donc réfractive que dans une petite partie de son étendue, & dans ses couches les plus basses, ou, si l'on veut, la matière réfractive seroit différente de l'atmosphère.

On sait que cette question sera également source d'intérêt pour les scientifiques anglais. Taylor (1685-1731) fera des recherches sur la question de la densité de l'air dans l'atmosphère en 1715 en s'inspirant des travaux de Newton (1642-1727) sur la méthode des fluxions : « I apply'd my self to consider throughly the Nature of the method of Fluxions, which has justly been the Occasion of so much glory to the great Inventor Sir Isaac Newton our more worthy President<sup>23</sup>. » Partant de l'hypothèse que « La densité de l'air est proportionnelle à la pression. C'est ce que l'expérience confirme »<sup>24</sup> et des lois newtoniennes de la gravitation, il trouvera que la pression décroît de manière logarithmique avec la hauteur de l'atmosphère ; d'où il s'ensuit que l'atmosphère serait étendue à l'infini. Cela pose évidemment question, puisque les résultats de Newton sur la gravitation universelle seraient alors infirmés, ce dernier ayant supposé que les corps célestes se meuvent sans frottement dans le vide<sup>25</sup>. D'où la conclusion prudente, mais surprenante de Taylor : « l'atmosphère [...] est contenue dans des limites finies, et peut-être celles-ci sont-elles assez petites<sup>26</sup>. »

---

<sup>19</sup> Cassini, Des irrégularités de l'abaissement apparent de l'horizon de la mer, *MARS* 1707, 197.

<sup>20</sup> Hawksbee, *Expériences physico-mécaniques sur divers objets*, 1709, XXX (Halley ?) ; Delisle, 1719 (citation ?), La Lande, 824.

<sup>21</sup> Jacques Cassini, Des réfractions astronomiques, *MARS* 1717 (1714), 33- 52. Voir en particulier p.37.

<sup>22</sup> Sur les réfractions astronomiques, *HARS* 1717 (1714), 65. Cassini fera cependant remarquer que son argumentation s'appuie sur une hypothèse qu'il va lui-même être amené à discuter, à savoir que la réfraction astronomique se fait au passage de l'éther à la surface réfractive seulement, et qu'ensuite les rayons lumineux, après s'être rompus à l'entrée de la matière réfractive, viendraient à l'œil « sans souffrir d'autres réfractions. »

<sup>23</sup> Taylor, 1715 ; voir Feigenbaum, *Taylor and the Method of Increments* Archives for History of exact sciences, 34, 1/2, (1985), 10.

<sup>24</sup> Brook Taylor, *Methodus Incrementorum directa & inversa*, (Londini, 1715), proposition XXV, hypothèse I, 102.

<sup>25</sup> Cela est souligné par Trussdell : « if the atmosphere of the earth extends far enough that heavenly bodies encounter it, the success of the system of the world calculated by the theory of motions *in vacuo* becomes

Dans l'HARS de 1717, présentant un Mémoire de Cassini sur la question, on notera une évolution en remarquant qu'il est nécessaire de bien connaître une autre propriété de l'Air, ou de la matière réfractive, qui suppose une possible variation progressive de la densité de l'Air avec la hauteur de l'Atmosphère. Une nouvelle loi de variation sera alors proposée<sup>27</sup> :

Il est possible que la matière réfractive soit uniforme & homogène, mais il y a plus d'apparence que sa densité est inégale, & augmente toujours en approchant de la Terre, & alors le rayon rompu décrit une Courbe, & la ligne par laquelle nous voyons l'astre est une tangente à cette Courbe. Mais quelle est-elle ?

La matière réfractive sera donc dotée de nouvelles propriétés. Cependant, dans le même temps, la question de l'existence de cette matière se posera progressivement différemment, et perdra alors de son importance et de sa centralité. En effet, avec les nouvelles approches de Taylor en Angleterre et de Varignon (1654-1722), puis Bouguer en France, l'utilisation nouvelle du formalisme mathématique s'appuyant sur le calcul infinitésimal va imposer un nouveau point de vue. Les questions concernant tant les causes de la réfraction que les propriétés du milieu réfractif seront alors occultées pour un temps. De cette évolution, on n'en trouve pas trace dans l'Encyclopédie à l'article AIR, ni même à l'article REFRACTION. Il n'en sera fait mention qu'à l'article TABLES<sup>28</sup>. Varignon, au cours de la lecture, en juin 1716, d'un Mémoire sur les différentes densités de l'air, utilisera donc le calcul différentiel et intégral<sup>29</sup>. Plus tardivement Bouguer, qui travaillera sur la réfraction astronomique depuis 1727, année, selon lui, de l'écriture de la première version de l'*Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, qui sera publié en 1729<sup>30</sup>, remportera le prix que proposait l'Académie, dans un contexte particulier, puisqu'on observera là aussi un intérêt nouveau, pour le calcul infinitésimal<sup>31</sup>, et plus généralement d'ailleurs pour les mathématiques<sup>32</sup>. On sait ainsi que Maupertuis (1698-1759) commencera, après son élection à la Royal Society (1728), et ensuite sa rencontre à Bâle (1729) avec Jean Bernoulli (1657-1748), à jouer un rôle dans la diffusion du calcul infinitésimal en France.

Cet attrait pour le nouveau calcul différentiel et intégral s'accompagnera d'une approche novatrice concernant les modes de propagation de la lumière. Bouguer, après avoir évité de se prononcer sur l'existence éventuelle de la matière réfractive<sup>33</sup>, évoquera cette question à

---

puzzling." C.A. Trussdell, 1954, p.XVI *Rational Fluid Mechanics 1687-1765*, in L. Euleri *Opera Omnia*, II, 12, Lausanne (1954). ; Taylor, op.cit. n.24, Prop. XXVI, 105.

<sup>26</sup> Taylor, o.c. in n.24, 105.

<sup>27</sup> Sur les réfractions astronomiques, *HARS* 1717 (1714), p.65.

<sup>28</sup> D'Alembert, o.c. in n.1., *Enc.*, XV, 797b.

<sup>29</sup> Il se réfère, fait exceptionnel, à l'importance des travaux de Taylor de 1715 : « Depuis cet écrit fait, M. Brook Taylor m'ayant donné au mois de Juin ou Juillet 1715 son livre de *Methodo Incrementorum directa & inversa*, tout récemment imprimé, j'y ai trouvé (prop. 26, page 103) qu'il avait aussi résolu le problème du précédent corol. 9 pour le cas des pesanteurs en raison réciproque des quarrés des distances au centre de la Terre & des densités en raison directe des pressions. » (Varignon, Rapports Des différentes densités de l'air, *MARS* 1716 (1718), p.135) Dans ce même Mémoire, Varignon donne une méthode géométrique pour construire la courbe représentant la variation de la densité avec la hauteur, à partir de l'équation différentielle ; on trouvera une démarche semblable dans le mémoire *De la méthode d'observer exactement sur mer la hauteur des astres* de Bouguer.

<sup>30</sup> Jean-Louis Morère, La photométrie, les sources de l'*Essai d'optique sur la gradation de la lumière* de Pierre Bouguer, 1729, *Revue d'histoire des sciences*, XVIII 4 (1965), p. 337 à 384.

<sup>31</sup> John L. Greenberg, Mathematical Physics in Eighteenth-Century France, *Isis*, 17, (1986), p.67.

<sup>32</sup> James E. McClellan, The Académie Royale des Sciences, 1699-1793 : A Statistical Portrait, *Isis*, vol.72, N°4, (1981), p.560.

<sup>33</sup> Bouguer, o.c. in n.3, paragraphes XL, XLII, et XLVI.

plusieurs reprises dans son ouvrage *Essai d'optique sur la gradation de la lumière* (1729) à la section II, I au chapitre *De la manière dont la lumière passe au travers des corps* ; il discutera l'hypothèse d'un autre mode de transmission de la lumière en s'adossant à l'idée d'éther, ce dernier étant considéré comme un fluide remplissant les pores des corps diaphanes. Mais cette vue des choses, partagée communément et qui n'est pas sans difficulté, posera la question des rapports entre éther et matière dans le cadre d'un modèle mécanique de la lumière. Un rayon de lumière peut rencontrer de la matière. Bouguer supposera alors qu'il exerce une pression sur le grain de matière ; ce dernier est alors le vecteur, à condition de supposer que les grains de matières ne soient pas durs, de la transmission à l'éther qui se trouve au-delà du grain de matière considéré. Pour cela, Bouguer, comme il le remarquera lui-même, se situera dans la filiation des recherches que Malebranche (1638-1715) avait effectuées en affirmant qu'il était nécessaire de reprendre « le sentiment du P. Malebranche sur la dureté des corps, que les parties grossières doivent transmettre la pression des rayons de lumière qui les rencontrent »<sup>34</sup>. C'est en effet cette conception de la matière que Malebranche avait exposé à la fois dans *De la recherche de la vérité*<sup>35</sup>, puis dans un Mémoire sur les Réflexions sur la lumière et les couleurs<sup>36</sup> : l'espace est plein, à la manière de Descartes (1596-1650) ; la matière subtile est infiniment comprimée, mais, à la différence de Descartes, les boules de son second élément<sup>37</sup> laissent place à des « boules très-molles », ou plutôt à de petits tourbillons, qui n'ont « de dureté que par la compression de la matière qui les environne »<sup>38</sup>. Cette conception d'une matière subtile, dont la dureté est due à la compression, et non à sa constitution, et dont dans le même temps, « toutes les parties (...) sont tres-fluides »<sup>39</sup>, lui avait permis de rendre compte de l'existence des différentes couleurs. Elles s'expliquaient par<sup>40</sup>

le plus & le moins de promptitude dans les vibrations du nerf optique, (...), laquelle change les espèces des couleurs ; & par conséquent la cause de ces sensations vient primitivement des *vibrations plus ou moins promptes de la matière subtile* qui comprime la rétine.

Par ce modèle, Malebranche avait également pu expliquer comment la lumière et les couleurs pouvaient se transmettre lorsque les rayons se croisaient.

S'appuyant ainsi sur ce point de vue de Malebranche, Bouguer poursuivra son analyse en affirmant que « le rayon ayant traversé ainsi le grain de matière 1, traversera de la même manière le grain de matière 2, et continuera ensuite son chemin en ligne droite »<sup>41</sup>. Il reprendra le cours de sa réflexion sur le sujet à la section V, II au chapitre *De la transparence de l'atmosphère*<sup>42</sup> :

Il est certain que la réfraction astronomique est trop petite, pour que le rapport des sinus d'incidence & de réfraction soit conforme à celui des densités de l'air. La réfraction suit certainement un autre rapport ; & peut-être aussi qu'elle est causée par

<sup>34</sup> Bouguer, *Essai d'optique sur la gradation de la lumière*, Paris, Joubert, 1729, 36.

<sup>35</sup> Nicolas Malebranche, *De la recherche de la vérité*, 1674, Paris, Vrin, 1976.

<sup>36</sup> Nicolas Malebranche, *Réflexions sur la lumière et les couleurs*, MARS, 1699 (1732), 22 à 36.

<sup>37</sup> Voir René Descartes, *Le Monde ou le Traité de la Lumière*, 1664-1666, rééd. 1996, Vrin, 24 à 25.

<sup>38</sup> Malebranche, o. c. in n.36, 22.

<sup>39</sup> Malebranche, o. c. in n.35, 261.

<sup>40</sup> Ibid, p.260.

<sup>41</sup> Bouguer, op.cit. in n.3 **Erreur ! Signet non défini.**, 37.

<sup>42</sup> Ibid., 51. On peut penser que Bouguer se réfère ici encore à Malebranche, voire à Descartes.

une matière particulière répandue dans l'Atmosphère, comme l'ont déjà soupçonné quelques Auteurs.

Bouguer, dans le *Mémoire* évoqué plus haut, remarquera que si l'on suppose que le rapport des dilatations de l'air entre deux couches considérées est proportionnel aux sinus d'incidence et de réfraction, alors<sup>43</sup> :

malheureusement, on ne connaît point les dilatations de la matière réfractive, dont on aurait besoin (...) Un rayon de lumière qui serait d'abord horizontal, devrait se rompre si considérablement dans l'Atmosphère, qu'il deviendrait presque vertical, avant de parvenir jusqu'à nous. C'est ce qui nous a obligé de supposer que les réfractions étaient causées dans l'Atmosphère par une matière différente de l'Air, et que nous avons appelée *réfractive*.

Pour cette raison, il semblerait préférable de découpler air et matière réfractive. Mais la formulation d'une telle hypothèse semble complexe, et Bouguer, plutôt que de choisir, préférera changer la loi de proportionnalité précédente et considérer, après Varignon, que le rapport des sinus des angles d'incidence et de réfraction est proportionnel « à quelque puissance ou à quelque fraction de ces dilatations<sup>44</sup>. ». La suite du *Mémoire* sera fondée sur cette proposition et consacrée à la recherche de la valeur de cette puissance. Hypothèse d'ailleurs féconde en ce qu'elle lui permettra d'écrire les expressions générales des équations différentielles de la réfraction astronomique.

Dortous de Mairan (1678-1771) poursuivra en 1731<sup>45</sup> la réflexion, notamment celle de La Hire, en s'interrogeant sur la composition de l'atmosphère qui, probablement, ne contient pas que de l'air, mais d'autres « parties de différente figure & de différente grosseur »<sup>46</sup>, telles que les corpuscules de lumière. Le baromètre, fort utilisé, ne peut, contrairement à ce que Mariotte pensait,

« représenter la hauteur réelle de l'Atmosphère Terrestre, ni jusqu'où elle est capable de produire des effets sensibles ; & rien de connu jusqu'ici ne saurait assigner des bornes à cette hauteur<sup>47</sup>. »

Il dissociera donc l'atmosphère qui est, remarquera-t-il, « plus étendue, & plus élevée vers l'Equateur & au-dessus de la Zone Torride, que hors des Tropiques & sous les Poles »<sup>48</sup>, et ce que le baromètre mesure, c'est-à-dire « cette partie de l'Atmosphère du poids de laquelle il est la mesure [qui est] plus dense dans les Pays voisins du Pole, que dans les Zones Tempérées & Torrides<sup>49</sup>. »

---

<sup>43</sup> Ibid., 47, XLVI.

<sup>44</sup> Ibid., 48, XLVI. Cette hypothèse est déjà envisagée par Varignon dans son *Mémoire* de 1716.

<sup>45</sup> Dortous De Mairan, *Traité physique et historique de l'aurore boréale*, ...suite des *Mémoires* de l'Académie royale des sciences, 1731, (Paris, Imprimerie Impériale, 1733) Section II, Chap.I, Des moyens qu'on a employés jusqu'ici, pour connaître la hauteur de l'Atmosphère Terrestre, Paris 1731.

<sup>46</sup> Ibid., Chap.II, *Que le Barometre ne nous indique point le véritable poids de l'Atmosphere, ni par conséquent sa hauteur*, 1733, p.52. Comme le remarque A. Rupert Hall, on peut, sur cette question, considérer Mairan dans la filiation des idées de Malebranche. A. Rupert Hall, *Newton in France*, History of science, 13 :4, 1975, p.243.

<sup>47</sup> Ibid., 53.

<sup>48</sup> Ibid., 53.

<sup>49</sup> Ibid., 53.



Ce qui est en jeu, c'est en fait la manière de caractériser l'Air, l'Atmosphère ; ce qu'on cherche, c'est être le plus précis possible, et ce afin de pouvoir établir des Tables de correction de la position des astres, en s'appuyant sur un traitement mathématique de la question. Encore faut-il pouvoir caractériser le milieu du point de vue de ses propriétés optiques, et ainsi connaître précisément la trajectoire suivie par la lumière dans la « matière réfractive », ce qui n'est possible qu'à condition de connaître ses propriétés. Il est également nécessaire de connaître la hauteur de l'Air, ou de la matière réfractive, ce qui nous ramène à l'article AIR de l'Encyclopédie ; en effet, rappelons que celui-ci commence ainsi : « corps léger, fluide, transparent, capable de compression & de dilatation, qui couvre le globe terrestre jusqu'à une hauteur considérable. »

Bouguer s'attachera à fonder ses raisonnements à l'aide des méthodes des séries, des retours des suites. Il s'appuiera par ailleurs sur l'idée introduite par Leibniz dans son formalisme, et reprise ensuite par le Marquis de l'Hospital (1661-1704)<sup>50</sup> et le Père Reyneau (1656-1728)<sup>51</sup> de « triangle caractéristique », ou différentiel, qui lui permettra alors (paragraphe XLIV) de caractériser des quantités infiniment petites. On sait que Leibniz, dans son article de 1684<sup>52</sup>, avait établi une relation de proportionnalité entre des quantités finies et des quantités infiniment petites à l'aide de triangles semblables, après avoir établi « l'Algorithme de ce calcul, que je nomme différentiel »<sup>53</sup>. Il avait formalisé cette idée en 1686 : « J'imaginai [...] pour toutes les courbes, un triangle que j'appelais caractéristique, dont les côtés fussent indivisibles (ou, pour parler mieux, infiniment petits), c'est-à-dire des quantités différentielles »<sup>54</sup>, et le marquis de l'Hospital l'avait reprise dès le début de la seconde section de son ouvrage<sup>55</sup>. Cette pratique mathématique particulière incite ainsi à placer Bouguer dans la filiation de savants qui se sont appropriés les résultats de l'analyse mathématique newtonienne ou leibnizienne, tels Taylor en Angleterre ou Varignon en France dont j'ai précédemment parlé. Pour ce qui est de la question de l'existence éventuelle d'une matière réfractive distincte de l'Air, on peut noter une évolution sensible de Bouguer :

« Il se pourrait fort bien faire qu'il n'y eût point de matière réfractive, & que les réfractions répondissent, non pas aux dilatations de l'air grossier, mais à une certaine fonction de ces dilatations que notre courbe BGI représentât. (...) nous serions même tentés d'admettre cette seconde hypothèse, mais nous continuerons néanmoins à désigner sous le nom de matière réfractive cette fonction que nous ne connaissons pas assez, des dilatations ou densité de l'air grossier<sup>56</sup>. »

<sup>50</sup> Guillaume François Antoine, Marquis de l'Hospital, *Analyse des infiniment petits pour l'intelligence des lignes courbes*. (Paris 1696, Imprimerie royale).

<sup>51</sup> -René Reyneau, *L'Analyse démontrée* (Paris : J. Quilliau, 1708), 2 tomes.

<sup>52</sup> Gottfried Wilhelm Leibniz, Nova methodus pro maximis et minimis, itemque tangentibus, quae nec fractas nec irrationales quantitates moratur et singulare pro illis calculi genus. *Acta Eruditorum*. (Octobre 1684), traduction Marc Parmentier, in *G.W. Leibniz. Naissance du calcul différentiel*. Vrin, coll. Mathesis, (Paris 1989). 102-103.

<sup>53</sup> Ibid., 110.

<sup>54</sup> Ibid., 111.

<sup>55</sup> L'Hospital, o.c. in n.50, 11.

<sup>56</sup> Bouguer, Second Mémoire sur les réfractions astronomiques, observées dans la zone torride ; avec diverses remarques sur la manière de construire les Tables, *MARS* 1748 (1753), 86. Maupertuis avait, en 1738, affirmé que les observations de Spole et Bilberg étaient erronées, et Cassini de Thury avait noté en 1742 que la réfraction astronomique était certainement dépendante de la température du milieu de propagation de la lumière. Maupertuis, *la figure de la terre*, 1738, XIX ; Cassini de Thury, *Sur la réfraction*, *MARS* 1742, 204.

C'est donc à une mathématisation de la question que nous assistons : peu importe l'existence, ou non, de la matière réfractive : il suffit de connaître en quelque sorte ses caractéristiques mathématiques.

Ces travaux de Varignon, de Bouguer, puis les suivants – Bouguer lira en 1737, puis en 1748, deux Mémoires sur le sujet à l'Académie – se distinguent des autres recherches menées en Angleterre. Ces dernières ont en commun de se situer dans la filiation des travaux de Newton et, contrairement aux travaux de Bouguer, s'appuient sur le concept de force de gravité (force centrale) dans les développements théoriques, et ne tiennent pas compte du milieu – air ou matière réfractive -. Ce n'est que dans une seconde partie du raisonnement qu'intervient une discussion sur le choix d'une loi de variation de la densité en accord à la fois avec la théorie et les observations. Cette approche finira par perdurer dans les Tables élaborées par Simpson (1710-1761)<sup>57</sup> en 1743, puis par Bradley (1693-1762)<sup>58</sup>. On trouvera d'ailleurs la même démarche influencée par les idées de Newton plus tard, lorsque Laplace (1649-1827) travaillera sur le sujet<sup>59</sup> au début du 19<sup>ème</sup> siècle dans une perspective nouvelle : pour établir l'équation différentielle du mouvement de la lumière, il s'appuiera donc sur le concept de force gravitationnelle centrale, mais, et c'est remarquable, cherchera une hypothèse ad hoc sur la loi de variation de la densité, sans même, comme Bouguer d'ailleurs, s'interroger sur l'éventualité de l'existence de cette matière réfractive. On se trouve alors dans un pur formalisme mathématique. Cette démarche conduira à une expression de la réfraction, qui sera alors communément acceptée.

Arnaud Mayrargue  
REHSEIS, Université Diderot Paris 7  
2 place Jussieu – case courrier 7064  
75251 PARIS CEDEX 05

---

<sup>57</sup> Thomas Simpson, *Dissertations on a Variety of Physical and Analmytical Subjects*, (London, 1743).

<sup>58</sup> Ces Tables ont été élaborées entre 1746 et 1752.

<sup>59</sup> Pierre-Simon Laplace, O.C. (Paris, Gauthier-Villars, 1878-1912), Tome 4, livre X, Chapitre premier *Des réfractions astronomiques*, 233 et suiv.